

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**  
**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ PRO AUTOMOBILY**



# **Měření krouticího momentu na poloosách**

**TORQUE MEASUREMENTS ON SEMI-AXES**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE: VOJTĚCH NOVÁK**

**AUTHOR**

**VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. MARTIN JURÁNEK, Ph.D.**

**SUPERVISOR**

**Ostrava 2016**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Vojtěch Novák**

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma:

**Měření krouticího momentu na poloosách**  
**Torque measurements on semi-axes**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Zadání

Seznamte se s metodami a snímači pro měření točivého momentu.

S ohledem na cenu, rozměry, přesnost a způsob zpracování dat navrhnete řešení pro měření točivého momentu na poloose automobilu.

Proved'te experimentální měření točivého momentu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Hoffman, K. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Metetchnik, 1989

ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. Druhé vydání. Praha: SNTL, 1983, 371s.

VÁVRA, J. Způsoby měření otáček a krouticího momentu v automatizovaných systémech [online]. Brno, 2009. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15392](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15392).  
Dilomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

A Guide for Installing a Torque Sensor from HBM. AZO Sensors [online]. United States, Marlborough, 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.azosensors.com/Article.aspx?ArticleID=604>

FOLTA, Zdeněk a Milena HRUDIČKOVÁ. Zpracování zátěžných spekter převodovky osobního automobilu za různých jízdních podmínek. In: ČVUT Praha [online]. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2008 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z:

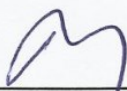
[http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2008/2008\\_004\\_01.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2008/2008_004_01.pdf)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

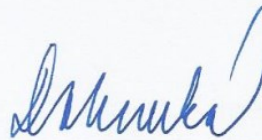
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Juránek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty



## Zásady pro vypracování bakalářské práce

### I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

### II.

#### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
  - Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
  - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.
- BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava


## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.**

V Ostravě 29. 4. 2016



.....

VOJTĚCH NOVÁK



## **ABSTRAKT**

Tato práce pojednává o možnostech měření krouticího momentu, zejména na poloosách automobilu. V první části se práce zabývá teoretickým významem krouticího momentu a jeho základních pojmů. V další části se zajímá teoretickým rozбором snímačů, jejich uplatnění v praxi a aplikací pro měření krouticího momentu. Následuje část pro možný návrh řešení a praktická část. Ta popisuje průběh vlastního měření na poloose prototypového elektromobilu SCX 2. V závěru jsou zahrnuty výsledky měření.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** krouticí moment, poloosa, snímač, tenzometr.

## **ABSTRACT**

This thesis discusses the possibilities of measurement of torque, especially at the semi-axes of the car. The first part deals with the theoretical significance of torque and its basic terms. The next section is interested in with theoretical analysis of sensors, their application in practice and applications for torque measurement. The following chapter is part of a possible solution design and practical part. It describes the process of the own measurement on semi-axes of a prototype electric vehicle SCX 2. In conclusion are included of the measurement results.

**KEYWORDS:** torque, semi-axe, sensor, strain gage.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NOVÁK, Vojtěch. Měření krouticího momentu na poloose. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství 2016. 52 str.  
Vedoucí práce Ing. Martin Juránek Ph.D.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi byli nápomocní při tvorbě této práce. Hlavně vedoucímu panu Ing. Martinu Juránkovi Ph.D., za poskytnutí odborných podkladů, rad a konzultací pro vypracování této práce.

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Krouticí moment .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Základní pojmy .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Způsoby měření a základní pojmy pro měření krouticího momentu .....</b>	<b>15</b>
4.1	Deformační člen .....	15
4.1.1	Nepřímé měření momentu síly .....	15
<b>5</b>	<b>Snímače .....</b>	<b>17</b>
5.1	O odporové snímače .....	17
5.1.1	Snímače s odporovým potenciometrem .....	18
5.1.2	Snímače s odporovými tenzometry .....	18
5.2	Indukčnostní snímače .....	21
5.2.1	Indukčnostní snímače s malou vzduchovou mezerou .....	21
5.2.2	Indukčnostní snímače úhlové výchylky .....	22
5.2.3	Snímače pro malé úhlové výchylky – měření krouticího momentu .....	22
5.2.4	Výhody indukčnostních snímačů .....	25
5.3	Magnetické snímače .....	25
5.3.1	Magnetoelastické snímače .....	25
5.3.2	Magnetoanizotropní snímače .....	26
5.3.3	Snímače využívající inverzi Wiedemannova jevu .....	29
5.3.4	Změna magnetické reluktance .....	30
5.4	Kapacitní snímače .....	31
5.4.1	Měření krouticího momentu .....	32
<b>6</b>	<b>Návrh řešení pro měření krouticího momentu na poloose .....</b>	<b>33</b>
6.1	Tenzometrické snímání krouticího momentu .....	33
6.1.1	Princip tenzometrie .....	33
6.1.2	Zapojení do Wheatstonova můstku .....	34
6.1.3	Kovové lepené tenzometry .....	36
6.1.4	Snímání z rotujících částí .....	37
6.1.5	Místo pro umístění tenzometru .....	39
6.1.6	Instalace tenzometru a úprava poloos .....	40
<b>7</b>	<b>Experimentální měření .....</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>Zdroje .....</b>	<b>51</b>

# 1 ÚVOD

Není tajemstvím, že automobily již několik let zažívají celosvětový rozmach a nezastávají pouze nutnou úlohu pro konání existenčních potřeb, ale také jsou projevem koníčků, módy či zábavy. Když se v současnosti mluví o jakémkoliv vozidle, většinou každého napadne, jak rychle dokáže jet. Rychlost se samozřejmě odvíjí od výkonu, který je úzce spjat s krouticím momentem. Je proto pochopitelné, že je dnes trendem a touhou tento krouticí moment měřit nejen klasickými konvenčními metodami, jako je například standardní Hallův snímač otáček, ale také novými možnými postupy k co nejpřesnějšímu určení hodnoty krouticího momentu. Jednou z těchto metod může být měření na poloose.

Cílem tedy této bakalářské práce je dle zadání změření krouticího momentu na poloose automobilu, případně elektromobilu. Snahou bylo zjistit, jakými variantami či metodami toho lze dosáhnout.

Nejprve bylo třeba se podrobně seznámit s problematikou snímačů, jelikož změřit krouticí moment na poloose je možné pouze jejich aplikací. Po důkladném prostudování těchto zákonitostí bylo dalším krokem navrhnutí funkčního principiálního postupu, který by byl možný použít v praxi.

V neposlední řadě bylo třeba daný postup experimentálně vyzkoušet, čehož jsem docílil nalepením odporových tenzometrů na prototypový elektromobil. V mém případě jsem použil klasické fóliové tenzometry pro měření deformací zapůjčené z katedry Materiálů a technologií pro automobilový průmysl.

## 2 KROUTICÍ MOMENT

Krouticí moment (též nazýván točivý), vyjadřuje velikost síly působící na páku. Krouticí moment je součinem působící síly a délky ramene páky. Pro jeho zvýšení lze použít dva následující způsoby - zvýšení síly, která působí na páku nebo prodloužení délky ramene páky (případně kombinace). Pokud dojde k prodloužení délky ramene páky, pak dojde ke zvětšení zdvihu pístu, a tudíž i ke zvýšení krouticího momentu. S vyšším zdvihem se snižuje objemová účinnost závislá přímo úměrně na zvyšujících se otáčkách. U vysoko objemových motorů s dlouhým zdvihem pístů se snižuje schopnost dosahování vyšších otáček, které jsou potřeba k dosažení vyššího výkonu.

Měření výkonu a krouticího momentu je jednou z nejdůležitějších postupů, který má zásadní vliv na výsledné jízdní vlastnosti vozidla. Měření se provádí buď pomocí zátěžových strojů – dynamometrů nebo pomocí snímačů momentů síly.

Krouticí moment je spolu s výkonem důležitým parametrem spalovacího motoru. Výkon a krouticí moment jsou ale dvě odlišné veličiny, mezi kterými však existuje souvislost popsána vztahem:

$$M_k = \frac{P}{2 \cdot n \cdot \pi} \quad (2.1)$$

Z toho je patrné, že pokud je cílem dosáhnout vysokého krouticího momentu, bude potřeba dosáhnout vysokého výkonu a zároveň nízkých otáček. Dále také platí, že pokud zachováme v průběhu otáček konstantní výkon, krouticí moment bude klesat. [15]



### 3 ZÁKLADNÍ POJMY

Moment síly  $M$  způsobuje úhlové zrychlení těles

$$\frac{d^2 \cdot \varphi}{dt^2} \quad [rad \cdot s^{-2}], \quad (3.1)$$

případně jejich deformaci dle vztahu

$$M = J \cdot \frac{d^2 \cdot \varphi}{dt^2} \quad [rad \cdot s^{-2} \cdot kg \cdot m^2], \quad (3.2)$$

kde  $J$  je moment setrvačnosti tělesa. Definice momentu, důležitá zejména pro pohyb tělesa kolem pevné osy, je dána vztahem

$$M = F \cdot r \quad [N \cdot m], \quad (3.3)$$

kde  $F$  je síla a  $r$  je rameno síly (kolmá vzdálenost přímky působení od osy otáčení). V souvislosti s rotačními účinky momentu se tento označuje jako krouticí. Pojmy ohybový a torzní moment vyjadřují převládající efekty působení momentu.

Výkon  $P$  rotujícího tělesa je dán vztahem

$$P = M \cdot \omega \quad [N \cdot m \cdot s^{-1} (W)], \quad (3.4)$$

kde je  $\omega$  je úhlová rychlost, která je dána vztahem

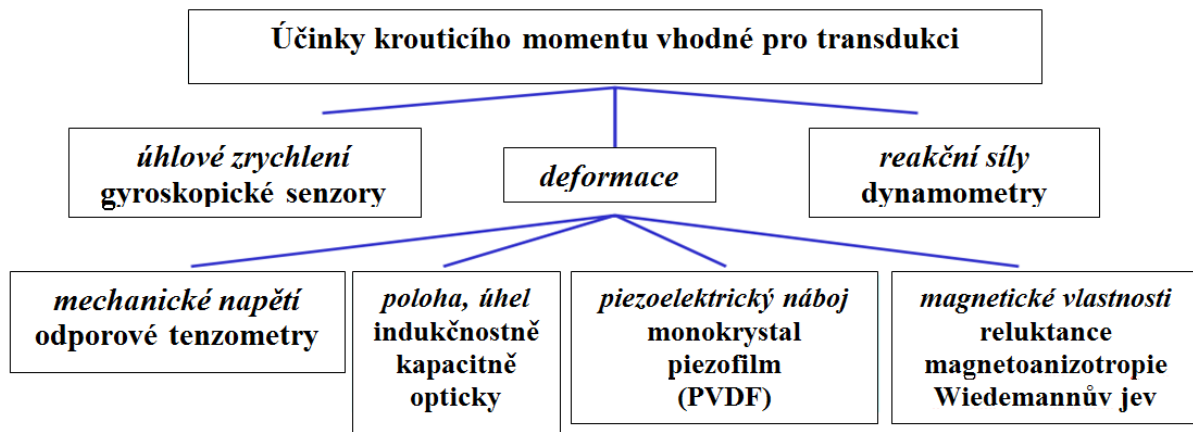
$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad [rad \cdot s^{-1}], \quad (3.5)$$

kde  $n$  vyjadřuje počet otáček za minutu.

Určení momentu se opírá o měření příčin jeho vzniku nebo účinků, tzn., že jde o měření nepřímá. Příčinou vzniku krouticího momentu u elektrických motorů je elektromagnetická interakce mezi poli rotoru a statoru. Proto lze například ze známých proudů kotvou  $i_a$  a proudem  $i_b$  budicím vinutím určit u stejnosměrného motoru krouticí moment jako součin:

$$M_k = k \cdot i_a \cdot i_b \quad (3.6)$$

Obdobně by bylo možné postupovat u pneumatických nebo hydraulických akčních členů, kde výstupní měřenou veličinou je tlak média. Nevýhodou této metody je nerespektování ztrát při přenosu momentu k zátěži (například třením v ložiscích a ztráty způsobené momentem setrvačnosti rotujících částí při změnách úhlové rychlosti). Proto slouží pouze jako orientační odhady a v praxi se téměř výlučně používají snímače (senzory), měřící účinky momentu.



Obr. 1 - Přehled účinků krouticího momentu

Přehled účinků krouticího momentu, technicky využívaných pro realizaci snímačů, uvedený v předcházejícím schématu, ukazuje, že naprosto převažují snímače, založené na deformačních účincích krouticího momentu. Těm bude dále věnována největší pozornost. [2]

## 4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ A ZÁKLADNÍ POJMY PRO MĚŘENÍ KROUTICÍHO MOMENTU

Dle zadání bakalářské práce jsou níže popsány možné metody pro změření krouťicího momentu, základní typy snímačů, popřípadě výpočty.

### 4.1 Deformační člen

Pro zjištění deformačního členu se zejména využívají dvě metody. Buď se může jednat o deformaci hřídele, což značí změření poměrného prodloužení na povrchu hřídele a měření výchylky, anebo se jedná o změnu magnetických vlastností hřídele.

Dle druhu hřídele lze snímače dělit na snímače obsahující měřící hřídel (snímače se vkládají k měřenému objektu) a na snímače s cizím hřídelem (snímače neobsahují měřící hřídel a připojují se k hřídeli měřeného stroje - je to řešení jednodušší, ale s nižší přesností měření).

Mezi základní a nejčastěji používané typy měřičů patří odporové, indukčnostní, kapacitní, fotoelektrické a magnetické snímače. Nepřímé měření (výpočet)

#### 4.1.1 Nepřímé měření momentu síly

U některých případů existuje možnost určení momentu síly z naměřených hodnot v závislosti na proudu, napětí a rychlosti otáčení. Pro motor o výkonu  $P$  [W] a otáčkách za minutu  $n$  je moment motoru  $M$  [Nm].

$$M = 60 \cdot \frac{P}{n} \quad (4.1)$$

Z velikosti momentu elektromotoru je možné orientačně zjistit tvářecí moment síly  $M_v$ .

$$M = M_v + M_d + M_p + M_i \quad (4.2)$$

Setrvačný otáčivý moment  $M_d$  je dán vztahem:

$$M_d = l \cdot \frac{d\omega}{dt} = mr^2 \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{2} \cdot md^2 \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (4.3)$$

kde je  $l$  moment setrvačnosti,  $d$  průměr hřídele a  $m$  hmotnost rotoru.

Moment při chodu naprázdno  $M_p$  vypočteme vztahem:

$$M_p = 60 \cdot \frac{P}{n} \quad (4.4)$$

Třecí moment  $M_i$  vypočteme vztahem:

$$M_i = \frac{F \cdot d \cdot \mu}{i_c \cdot \eta} + \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \cdot \frac{M_v}{i_c}, \quad (4.5)$$

kde  $F$  je síla působící na hřídel,  $D$  průměr kružnice,  $\mu$  součinitel tření v ložiskách,  $i_c$  celkový převod a  $\eta$  účinnost převodu od motoru až k zátěži.

Vypočtení jednotlivých momentů z naměřených hodnot není zcela přesné a ne vždy vhodné, jelikož je pro tento postup nezbytné změřit několik veličin. Navíc zjištění účinnosti může být velice obtížné. [5], [9]



## 5 SNÍMAČE

Snímač je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem snímač je ekvivalentní pojmu senzor, převodník nebo detektor. Citlivá část senzoru se občas označuje jako čidlo. Snímač jako primární zdroj informace snímá sledovanou fyzikální, chemickou či biologickou veličinu a dle určitého definovaného postupu ji transformuje na měřicí veličinu – nejčastěji na elektrickou. Existují také snímače, u nichž je neelektrická veličina přímo transformována na číslicový signál.

Snímače se dělí dle měřených veličin (teplota, tlak, zrychlení, poloha, krouticí moment atd.), fyzikálního principu (odporové, indukčnostní, kapacitní, magnetické, optické atd.), dle styku s měřeným prostředím (kontaktní, bezkontaktní), dle transformace signálu (aktivní, pasivní) a dle výrobní technologie (mechanické, elektrické, pneumatické, optoelektronické atd.).

Aktivní snímač – snímač, který se působením snímané veličiny chová jako zdroj energie.

Pasivní snímač – snímač, u kterého je nutné elektrickou veličinu (indukčnost, kapacitu, odpor) dále transformovat na analogový napěťový nebo proudový signál, přičemž měří veličinou je amplituda, kmitočet, fáze aj. Nutnost napájení. [2], [3]

### 5.1 Odporové snímače

Odporové snímače patří do skupiny snímačů pasivních. Měřená neelektrická veličina je převedena na změnu odporu. Odporové snímače bývají zapojeny do obvodů s pomocným napětím. Nejčastěji to bývá vyvážený nebo nevyvážený můstek. Odporové snímače se vyznačují jednoduchostí. Tato skupina snímačů patří mezi nejrozšířenější a umožňuje řešení většiny problémů z oboru měření neelektrických veličin. [1]

Každý snímač je třeba spojit a měřicím obvodem pomocí vodičů nebo spojovacího vedení. Vlastnosti tohoto vedení mohou výrazně ovlivnit parametry snímače a přesnost měření. Jedná se o nejrozšířenější snímače. [9]

Deformaci měřicího členu (hřídele) můžeme měřit dvěma způsoby:

- a) Odporovým potenciometrem
- b) Odporovým tenzometrem

### 5.1.1 Snímače s odporovým potenciometrem

Oddorový potenciometre pracující jako snímač úhlové výchylky. Tento způsob vyžaduje velké deformace měřicího členu. Jedná se o málo využívaný typ snímače. Používá se jako převodník k mechanickým snímačům momentu síly. Potom vytváří výstupní elektrický signál. [5], [9]

### 5.1.2 Snímače s odporovými tenzometry

Oddorový tenzometr pracující jako snímač smykového napětí. Použití tenzometrů je velmi časté a je vhodné pro dynamická měření. Jako deformačního prvku se užívá většinou hřídele. Na jejím povrchu jsou ve směru maximálních smykových napětí, tzn. pod úhlem 45° vzhledem k ose hřídele, nalepeny odporové tenzometry, které vytvářejí celý můstek. Je nutno vyloučit vliv ohybových a tahových napětí. [5], [9]



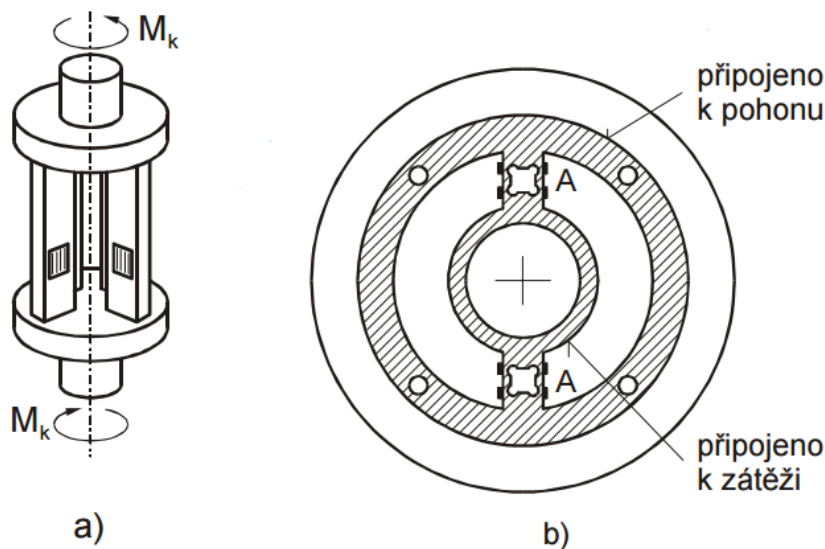
Obr. 2 - Pevný snímač krouticího momentu tenzometrického principu od firmy ESA [9]

Určují buď přímo deformaci hřídele mezi motorem a zátěží, nebo je deformaci podroben vložený torzní pružný člen speciálně tvarovaný pro tyto účely. Z rozboru mechanických napětí v jednoduchém případě hřídele nebo pružného členu tvaru plného nebo i dutého válce vyplývá, že hlavní napětí jsou orientovaná pod úhly 45° k ose. Jde o napětí typu tah – tlak s nulovou smykovou složkou a s maximální hodnotou na povrchu válce. Deformace ve směru hlavních napětí je dána rovnicí

$$\epsilon = \frac{r}{2 \cdot G \cdot J} \cdot M, \quad (5.1)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku. Největší citlivosti a kompenzace vlivu teplotní dilatace a ohybových deformací se dosáhne nalepením čtyř aktivních tenzometrů pod úhlem 45°, přičemž dva z nich jsou umístěny na opačných stranách pružného členu. Návrh pružného

členu je kompromisem mezi požadavkem citlivosti ( $GJ$  zanedbatelné) a dynamických vlastností, vyžadujících velkou tuhost. Z tohoto pohledu je vhodný dutý válec, další využívané tvary jsou na obr. 3. [2], [6]



Obr. 3 – a) Křížový pružný člen pro měření krouticího momentu  
b) Prstencový pružný člen pro krouticí moment [6]

Výhodou křížového členu na obr. 3a je zejména snadné lepené tenzometrů na ploché elementy. Odolností vůči parazitním deformacím vyniká člen na obr. 3b, v němž je střední prstec spojen se zátěží a vnějším motorem. Oba prstence jsou spojeny pružnými členy typu paralelogram s možností vytvořit z použitých tenzometrů dva plné můstky. [2], [6]



Obr. 4 - Rotační snímač s přenosem třecími kroužky tenzometrického principu od firmy ESA [9]

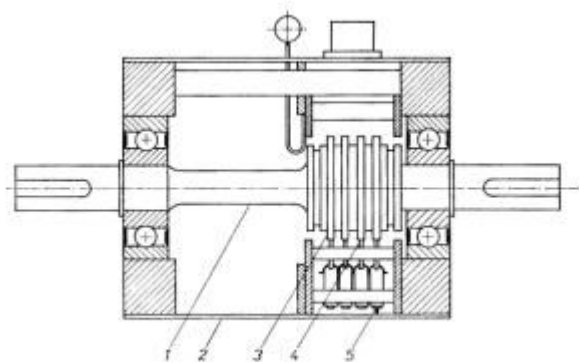


Obr. 5 - Rotační snímač s bezdotykovým přenosem tenzometrického principu od firmy ESA [9]

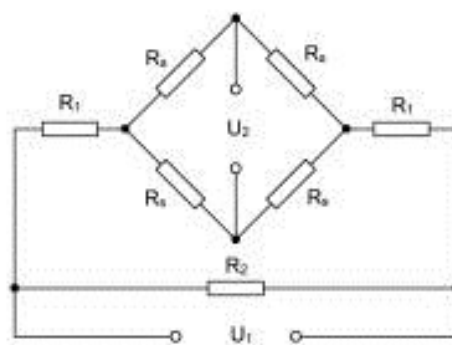


Obr. 6 - Převodník krouticího momentu od firmy HSB [9]

Na obr. 8 je zobrazen princip snímače momentu síly s odporovými tenzometry. Na měřicí části hřídele 1 jsou do můstku nalepeny odporové tenzometry. Signál z měřících a napájecích bodů měřicího můstku je veden přes sběrací kroužky 3 a sběrače 4 na svorkovnici 5 na satorové části. Celý snímač je uzavřen krytem 2. Aby nedocházelo k opotřebení sběračů v době, kdy se neměří, je možno sběrače od kroužků pákovým mechanismem odklonit. Na obr. 7 je schéma elektrického zapojení snímače do můstku. [1]



Obr. 7 - Konstrukční řešení snímače krouticího momentu od firmy HSB [9]



Obr. 8 - Zapojení snímače do můstku [9]

Rozsah měřených hodnot je 10 N.m až 100 kN.m, dosahují přesnosti až 0,1 %. Výstupní napětí je 1 až 2 mV na 1 volt napájecího napětí. Teplotní rozsah snímače je 0 až 70 °C. Nejvyšší otáčky 7000 až 15000 min<sup>-1</sup>. Při dynamických měřeních je nezbytné napájení můstku stejnosměrným napětím nebo střídavým napětím o vyšším kmitočtu. [1]



## 5.2 Indukčnostní snímače

Indukčnostní snímače představují rozsáhlou skupinu pasivních snímačů. Měřená neelektrická veličina je snímačem převedena na změnu indukčnosti. Indukčnostní snímače bývají zapojeny do obvodu s pomocným střídavým napětím. Nejčastěji to bývají obvody můstkové či rezonanční. Proto tato skupina umožňuje řešení většiny problémů z oboru měření neelektrických veličin. Každý indukčnostní snímač je nutno spojit s měřicím obvodem pomocí vodičů nebo spojovacího vedení. Vlastnosti tohoto vedení mohou výrazně ovlivnit parametry snímače a přesnost měření. Vlastní indukčnostní snímač je tvořen cívkou (nebo systémem cívek) bez feromagnetického jádra či s feromagnetickým, popřípadě neferomagnetickým elektrickým vodivým jádrem. Působením neelektrické veličiny dochází k vzájemnému posunutí těchto částí nebo ke změně jejich elektrických vlastností. Cívka se vyznačuje indukčností, jejíž velikost závisí na počtu závitů, elektrických a magnetických vlastnostech jádra a na geometrických rozměrech cívky a jádra. Pokud jsou uvedené veličiny ovlivňovány vstupní měřenou neelektrickou veličinou, mění se i indukčnost cívky. Indukčnostní snímače vykazují též odporové a kapacitní parazitní vlastnosti. [1], [3]

### 5.2.1 Indukčnostní snímače s malou vzduchovou mezerou

Jako snímačů momentu síly se používají především typy s malou vzduchovou mezerou. Tento typ snímačů patří k nejvíce využívaným pro měření geometrických rozměrů, krouticího momentu, malých rozdílů polohy a dalších veličin. Pracuje v těchto režimech:

- 1) Pohyblivá část feromagnetika:
  - a) změna velikosti vzduchové mezery
  - b) změna plochy vzduchové mezery

- 2) Pohyblivá cívka:

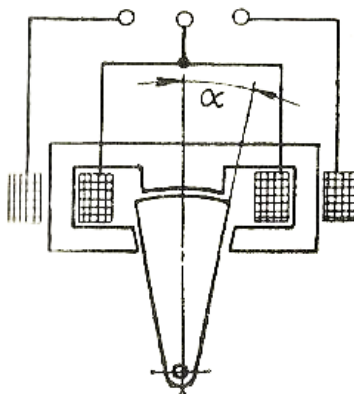
Snímače pracují se změnou velikosti vzduchové mezery, vyznačují se velkou nelinearitou základní charakteristiky a používají se většinou pouze v diferenčním uspořádání pro měření malých změn. [1]

### 5.2.2 Indukčnostní snímače úhlové výchylky

V technice měření neelektrických veličin jsou měření úhlových výchylek značně rozšířena. Nutnost těchto měření je dána potřebou měření krouticího momentu, úhlových deformací, úhlových rychlostí, úhlové polohy různých částí a mechanismů. Úhlové výchylky mohou mít hodnotu jak zlomku stupně, tak několika set stupňů. Můžeme tedy snímače rozdělit do dvou skupin – snímače pro malé a velké úhlové výchylky. [1]

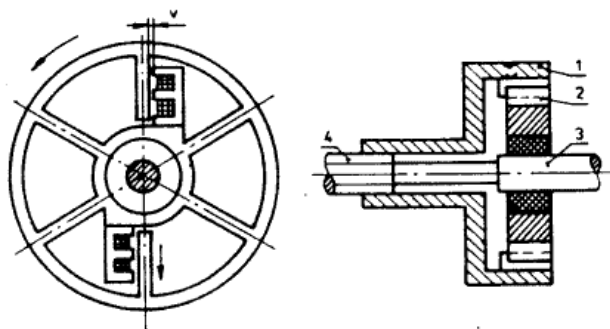
### 5.2.3 Snímače pro malé úhlové výchylky – měření krouticího momentu

Na obr. 9 je snímač, který je používán pro měření krouticího momentu, a to indikací úhlového natočení dvou průřezů měřené hřídele, přičemž kotva je spojena s jedním průřezem a pevná část s druhým průřezem. Snímač předpokládá přenos signálu z rotujícího hřídele k vlastnímu měřiči. [1]



Obr. 9 - Snímač malé úhlové výchylky pro měření krouticího momentu [1]

Úhlová výchylka dvou průřezů hřídele se převede na změnu vzduchové mezery. Speciální konstrukce umožňují umístění vinutí na statorovou část hřídele. Tím jsou odstraněny komplikace s přenosem signálu z rotujícího hřídele. Takové řešení je velmi složité. Na obr. 10 je zobrazeno uspořádání snímače s využitím běžného indukčnostního snímače polohy. Ohybová deformace ramen řemenice se měří dvěma shodnými snímači polohy, jejichž cívky jsou zapojeny do můstku. [8], [9]



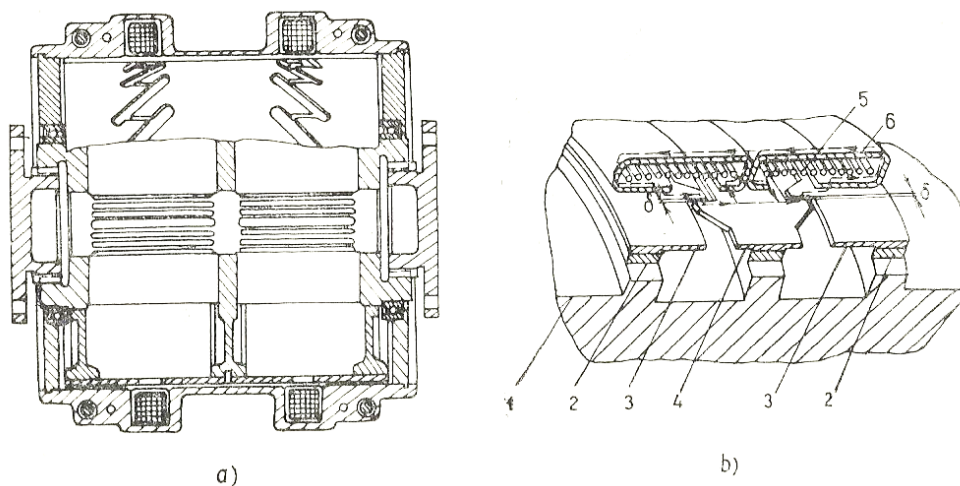
Obr. 10 - Indukční snímač momentu [8]



Obr. 11 - Statické snímače krouticího momentu 8624, 8627, 8628, 8632 [9]

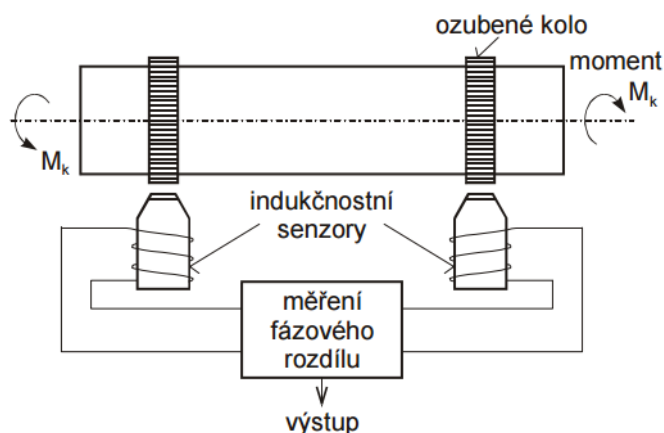
Na obr. 12a je naznačena konstrukce snímače krouticího momentu. Na obr. 12b je detail magnetického obvodu indukčního snímače s malou vzduchovou mezerou. Na hřídeli 1 jsou v určité vzdálenosti od sebe umístěny prstence 2 z nemagnetického materiálu. Na nich jsou umístěny dva prstence 3 z feromagnetického materiálu se zuby, mezi nimiž je druhá část magnetického obvodu 4. Zuby obou částí magnetického obvodu jsou od sebe odděleny vzduchovou mezerou. Na obou částech magnetického obvodu je navinutá cívka, která se skládá ze dvou válcových vinutí 5, uzavřených do tělesa 6 z feromagnetického materiálu. Vinutí 5 je pevné. Při průchodu proudu vinutím vzniká magnetický tok, který se uzavírá přes vzduchové mezery  $\delta$  jednotlivých zubů. Působením krouticího momentu vzniká úhlové posunutí dvou průřezů hřídele 1, na nichž jsou upevněny prstence 3, což vede ke

změně délky vzduchových mezer  $\delta$ . V důsledku toho se mění indukčnost a tedy impedance obou vinutí, jež jsou zapojeny do můstkového obvodu. Snímač se používá až do 4000 ot/min. jeho výhodou je, že má výhody pouze na statorové části. [1]



Obr. 12 – a) Konstrukce snímače krouticího momentu  
b) Detail magnetického obvodu snímače krouticího momentu [1]

Na obr. 13 jsou na hřídeli ve vzdálenosti  $L$  umístěna dvě ozubená kola z feromagnetického materiálu. V indukčních snímačích umístěných proti ozubeným kolům vznikají při rotaci periodické změny magnetické reluktance (mění se cívka-zub a cívka-mezera), vyvolávající odpovídající změny indukčností  $L_1$ ,  $L_2$ . Výstupní signály obvodů pro měření  $L_1$ ,  $L_2$  se upravují do tvaru dvou sledů impulsů (vyloučí se tak vliv změn na vzduchové mezery mezi statorovými cívkami a koly) a měří se vzájemné zpoždění  $\Delta t$  obou sledů. Z hodnoty zpoždění  $\Delta t$  a frekvence impulsů se odvádí údaje, potřebné pro výpočet výkonu  $P$ . [2]



Obr. 13 - Snímač krouticího momentu s úhlovou deformací [6]



### 5.2.4 Výhody indukčnostních snímačů

Pracují bezdotykově a bez zpětného působení. Jsou odolné vůči vlivům provozního prostředí. Mohou nahrazovat mechanické koncové spínače. Množnost použití v ne příliš přívětivém prostředí (např. prostředí s nebezpečím výbuchu apod.). [4]

## 5.3 Magnetické snímače

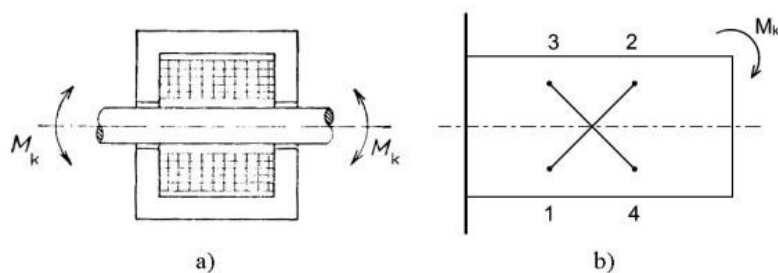
Jsou tvořeny uzavřeným magnetickým obvodem a využívají změny permeability feromagnetika při změně měřené neelektrické veličiny. V důsledku této změny se mění impedance magnetického obvodu a indukčnost nebo vzájemná indukčnost jedné nebo několika cívek. Z hlediska vstupní veličiny používáme magnetické snímače pro měření mechanického napětí, tlakových a tahových sil, moment kroucení apod.

Měření krouticího momentu pomocí magnetických snímačů lze několika způsoby. [1], [2], [9]

### 5.3.1 Magnetoelastické snímače

Využívají změny magnetických vlastností feromagnetika při jeho deformaci. Pro výrobu se často používá permalyová slitina, která obsahuje 78,5 % niklu. Největší hodnotu relativní změny permeability má slitina s obsahem 65 % niklu. Snímače lze též vyrobit z obyčejné měkké oceli. I když citlivost snímače s těmito materiály je menší než s permalyoem, je toto řešení pro běžnou praxi dostačující. Měření krouticího momentu touto metodou je možno dvěma způsoby. [1]

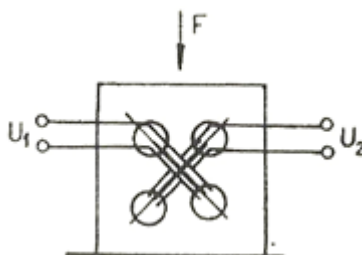
Nejjednodušší uspořádání magnetoelastického snímače je na obr. 14a. Na hřídeli namáhaném momentem síly je nasunuta cívka a hřídel je součástí elektrického obvodu. Jeho deformací dochází ke změně permeability a tím i ke změně indukčnosti cívky. Tento způsob není příliš rozšířen z důvodu chyb, které způsobují vůle v ložiscích a odchylka od kruhového profilu hřídele. Na obr. 14b se měří změna permeability mezi body 1 - 2 nebo 3 - 4 pomocí přiloženého indukčnostního snímače tvaru U. Řešení krouticího momentu těmito metodami je dosti výjimečné, protože je provázeno mnoha parazitními vlivy, jejichž kompenzace je obtížná. [9]



Obr. 14 - a) cívka nasunutá na hřídeli b) použitím indukčnostního [9]

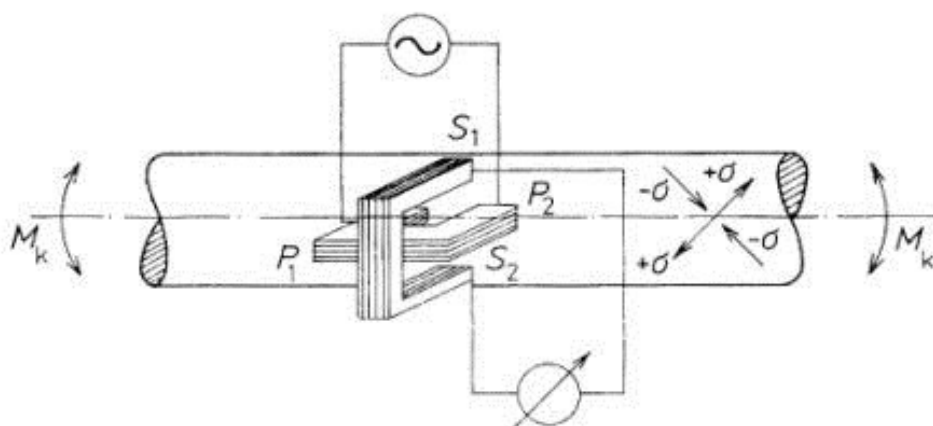
### 5.3.2 Magnetoanizotropní snímače

Princip naznačen na obr. 15. V tělese z plného feromagnetického materiálu jsou vytvořeny čtyři otvory tak, že jsou kolem středu symetrické. Otvory je protaženo primární a sekundární vinutí. Při dokonalé geometrické a magnetické symetrii se indukuje do sekundárního vinutí minimální napětí. [1]



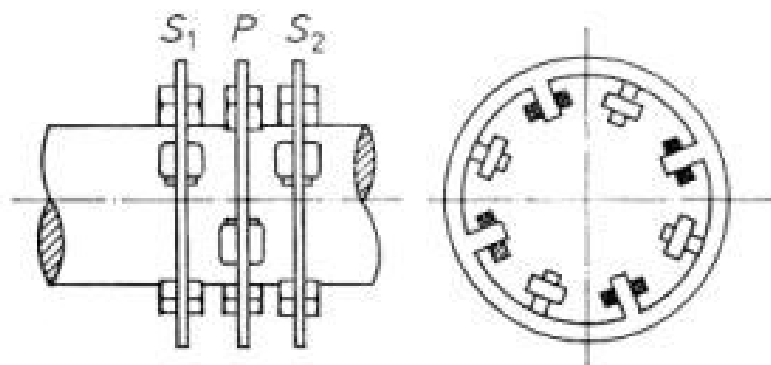
Obr. 15 - Princip magnetoanizotropního snímače [1]

Na obr. 16 je naznačen princip magnetoanizotropního snímače, který je složen ze dvou magnetických obvodů tvaru U. Cívky primárního obvodu jsou připojeny ke zdroji střídavého proudu. Obě jádra jsou umístěna svými konci blízko hřídele, a to tak, že budící magnetický obvod je rovnoběžný s osou hřídele. Budící obvod vytvoří na povrchu hřídele téměř souměrné pole. Díky této souměrnosti nejde tok sekundárním obvodem, pokud je ovšem hřídel nezatížený. Naopak při torzním zatížení hřídele se magnetické pole deformuje a v důsledku toho vznikne v sekundárním magnetickém obvodu tok úměrný deformaci. V sekundárních cívkách se indukuje napětí, jehož velikost je přímo úměrná krouticímu momentu. Takto konstruovaný snímač je velmi citlivý na nehomogenitu hřídele. [1]



Obr. 16 - Princip magnetoanizotropního snímače krouticího momentu [9]

Tyto nežádoucí vlivy odstraňuje tzv. prstencový (kruhový) snímač (viz obr. 17). Ten se skládá ze tří stejných prstenců, které mají vyčnívající póly  $S_1$ ,  $P$ ,  $S_2$  a mohou být pro rychlou a snadnou montáž složeny ze dvou polovin. Vinutí cívek na jednotlivých pólových nástavcích jsou zapojena do série tak, že mají střídavě opačný smysl. Střední prstenec je proti oběma vnějším prstencům posunut o polovinu pólové rozteče, přičemž vzdálenost mezi prstenci je rovněž rovna polovině pólové rozteče. Střední prstenec slouží jako budící magnetický obvod. Oba vnější prstence jako sekundární (měřicí), jejich snímací cívky jsou zapojeny v sérii s opačným smyslem vinutí. Při zatížení hřídele momentem síly vznikají v povrchových vláknech hřídele tečná napětí. Tato napětí mají tahovou složku  $+\sigma$  a tlakovou  $-\sigma$ . Obě působí k ose hřídele pod úhlem  $45^\circ$ . Tím dochází ke změně permeability. Tento typ snímače má malé rozměry, především měřící délku, výstupní signál se snímá ze statorové části, není citlivý na prach, vlhkost chvění apod. Vyrábí se pro rozsah 50 N.m až 1 kN.m, pro rozsah otáček 0 až 100 000 ot/min. [1], [9]

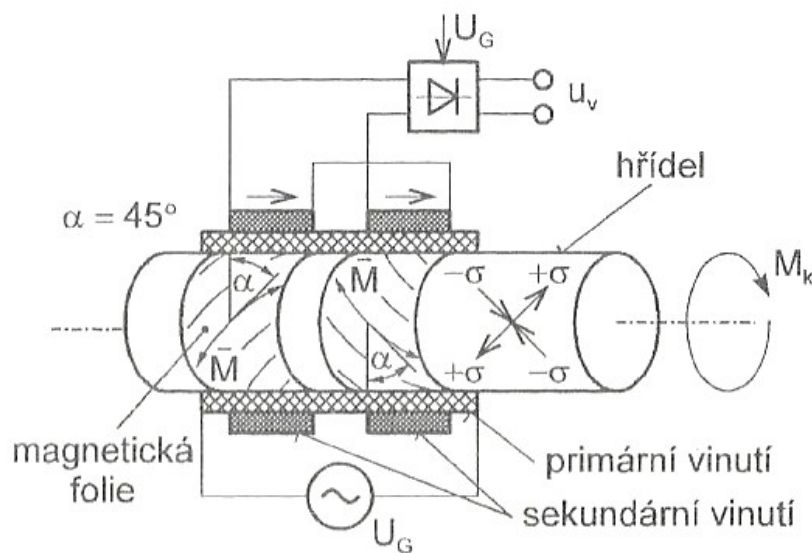


Obr. 17 - Princip kruhové snímače momentu [9]



Obr. 18 - Statické snímače krouticího momentu od firmy Omega v montážním provedení na osu magnetoanizotropního typu [9]

Další možností je využití snímače využívající magnetoanizotropie amorfních materiálů. Ten má hřídel, na němž jsou upevněny dvě mechanicky předpjaté folie ze slitiny  $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ , jejichž anizotropie má při  $M_k = 0$  směr hlavních napětí (viz obr. 20). Hřídel je umístěn v ose primárního a dvou sekundárních vinutí. Rozdílové napětí sekundárního vinutí má při zatížení konečnou hodnotu, úměrnou krouticímu momentu. Směr momentu lze určit synchronní demulací výstupního napětí. Výhodou snímače je snadný přenos signálu z rotující hřídele. [2]

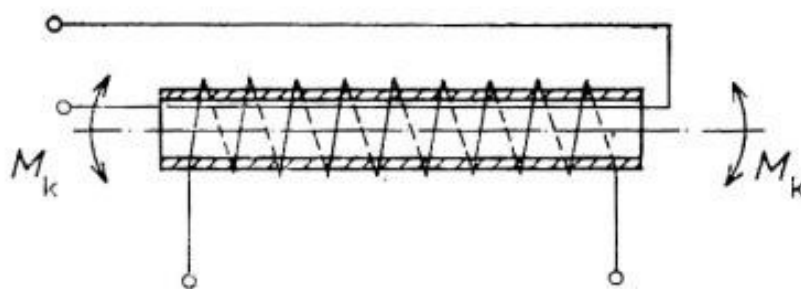


Obr. 19 - Snímač krouticího momentu s magnetickou fólií [2]

### 5.3.3 Snímače využívající inverzi Wiedemanna jevu

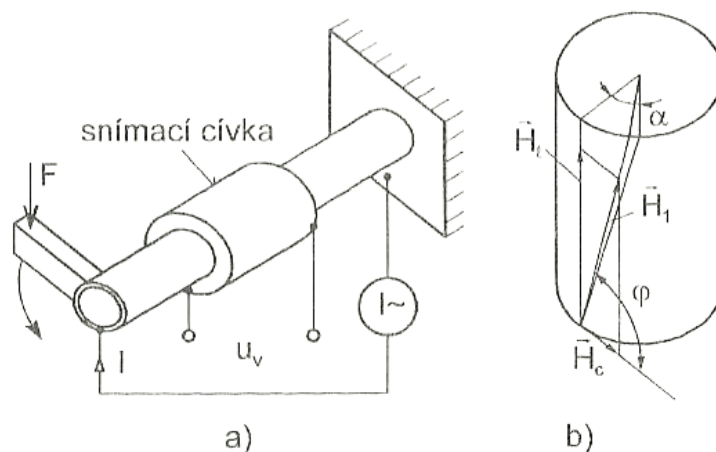
Wiedemannův jev spočívá v tom, že feromagnetická tyč nebo trubka kruhového průřezu, upnuta na jedné straně, se krouť kolem osy, je-li magnetována současně podélným a kruhovým magnetickým polem.

Konstrukce snímače krouticího momentu musí být taková, aby nedošlo při montáži snímače k namáhání torzní trubky. Kryt snímače má chránit magnetický obvod snímače před vnějším parazitním magnetickým polem a má přenést reakci upevnění torzní trubky. Kryt snímače má také chránit torzní trubku před případným magnetickým poškozením a před deformací torzní trubky při upevňování snímače na vnější plášť. Uvnitř pláště je pouzdro z nemagnetického materiálu, které zamezuje, aby se parazitní magnetický tok v plášti uzavřel přes torzní trubku. Tento princip je vhodný pro realizaci snímače krouticího momentu bez otáčení torzního článku. (obr. 20) [1]



Obr. 20 - Princip Wiedmannova snímače v řezu [9]

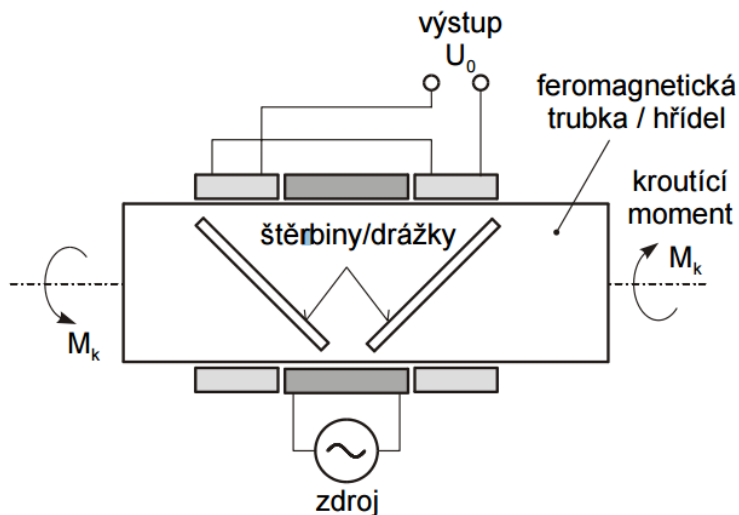
Snímač se tedy skládá z feromagnetického válce magnetovaného střídavým proudem ve směru osy a vytváří kruhové pole s vektorem intenzity  $\vec{H}_c$  ve směru rovnoběžném s plochou snímací cívky, takže indukované napětí  $u_v = 0$ . Při zkroucení trubky o úhel  $\alpha$  se vektor intenzity pole  $\vec{H}_l$  natočí o úhel  $\varphi$ . Vznikne tak složka  $\vec{H}_l$  kolmá k ploše snímací cívky a vyvolá indukované napětí úměrné úhlu  $\alpha$  a tedy i krouticímu momentu. V praktických konstrukcích se zvýší intenzita pole budícím vinutím o desítkách závitů, provlečeným dutinou trubky. Snímací cívka může mít několik tisíc závitů, a jelikož nelze přesně zajistit vzájemnou kolmost obou cívek a odstranit parazitní kapacitní vazby, nelze dosáhnout pro  $M_k = 0$  hodnoty  $u_v = 0$ . Část zbytkového napětí pronikající kapacitní vazbou může vyloučit jev potlačení kvadrurní složky při synchronní demodulaci (obr. 21). [2]



Obr. 21 - Princip Wiedemannova snímače [2]

### 5.3.4 Změna magnetické reluktance

Deformace vyvolaná krutem působí na trubku z feromagnetického materiálu se dvěma řadami štěrbin, orientovaných ve směru hlavních napětí (obr. 22). Krouticí moment způsobí zvětšení štěrbin u jedné a zmenšení u druhé.



Obr. 22 - Magnetický štěrbinový senzor [6]

Sekundární cívky, umístěné nad trubkou proti vzájemně kolmým štěrbinám, snímají napětí indukované z primárního vinutí. Rozdílové napětí sekundárů odpovídá rozdílu magnetických reluktancí štěrbin při deformaci a časové změny  $M_k$ , je nutné použít synchronní demodulaci. [2]

## 5.4 Kapacitní snímače

Základem kapacitního snímače je dvou nebo několika elektrodový systém s parametry proměnnými působením měřené neelektrické veličiny. Tento typ snímače patří už od počátku vývoje metod neelektrických veličin k nejpoužívanějším.

Kapacitní snímače používáme především tam, kde se uplatňují jejich přednosti, tj. malá hmotnost elektrod, jednoduchá konstrukce apod. Pro správnou funkci a pro dosažení co největší přesnosti měření je důležité znát velikost jednotlivých parazitních vlivů (indukčnost, odpor). Poněvadž kapacita závisí na rozměrech snímače, mohou změny rozměrů a změny teploty okolí způsobit značnou chybu, protože součásti snímače, zhotovené z různých materiálů, mají různé teplotní součinitele roztažnosti. Správnou volbou geometrických rozměrů součástí snímače se zřetelem na jejich součinitele teplotní roztažnosti lze však radikálně zmenšit chyby při měření.

Důležitý je také způsob upevnění jednotlivých elektrod. Všechny části snímače musí být vzájemně pečlivě izolovány. Kapacitní snímač má většinou velkou impedanci. Při nedostatečně velkém povrchovém odporu izolantu prochází po jeho povrchu proud od jedné elektrody ke druhé a vytváří na tom úseku úbytek napětí. Izolační vlastnosti se mohou měnit s časem a vlivem vnějších podmínek (vlhkosti, tlaku, teploty).

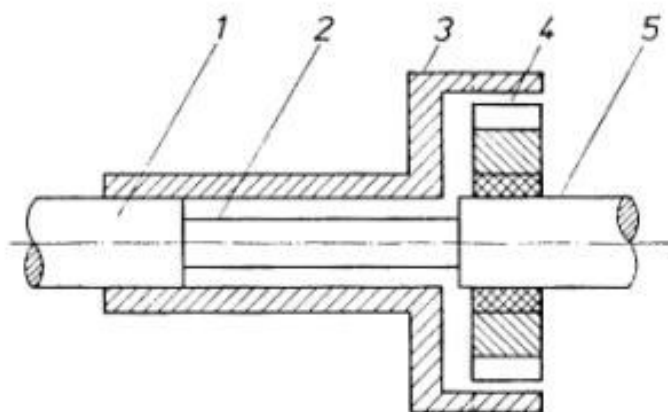
Kapacitní snímače se vyznačují jednoduchou konstrukcí, snadnou montáží a obsluhou. Pomocí těchto snímačů se měří především – poloha, tlaková síla, tlak, krouticí moment atd. [1], [3]



Obr. 23 - Kapacitní snímač momentu od firmy Dicont [10]

### 5.4.1 Měření krouticího momentu

Na obr. 24 je znázorněn princip kapacitního snímače krouticího momentu. Kondenzátor je tvořen dvěma elektrodami 3 a 4 zubového tvaru, uchycenými pevně na hřídeli. Elektroda 4 je izolována od hřídele 5. Zmenšením průměru hřídele 2 dojde většímu úhlovému natočení elektrod a tím ke změně kapacity. Výstupní signál je z rotujícího hřídele vyveden na statorovou část. [1], [9]



Obr. 24 - Princip kapacitního snímače



## 6 NÁVRH ŘEŠENÍ PRO MĚŘENÍ KROUTICÍHO MOMENTU NA POLOOSE

Měření kroučicího momentu tímto způsobem by mělo vytvořit komplexní zátěžné spektrum převodovky automobilu při různých režimech jízdy. Poloosy jsou namáhány kroučícím momentem od pohonu při zrychlení a kroučícím momentem opačného znaménka při brzdění motorem. Dále jsou namáhány při brzdění kol. Točivý moment, kterým je zatížena převodovka při různých režimech jízdy, se projeví v poloosách.

K určení kroučicího momentu se využije telemetrický systém bezkontaktní snímače tenzometrického typu z rotující části. Taktéž se při takovém měření na poloose projevuje kroučící moment převodovky. Znalost kroučicího momentu v poloose umožní získat přehled zatížení jednotlivých rychlostních stupňů převodovky a stanovit zátěže při různých režimech automobilu. [12], [15]

### 6.1 Tenzometrické snímání kroučicího momentu

Snímání kroučicího momentu na rotující součásti se dá realizovat buď bezkontaktní metodou rotující a stacionární antény (telemetrie) nebo kontaktní metodou.

#### 6.1.1 Princip tenzometrie

Odporový tenzometr je založen na předpokladu změny jeho odporu a deformace (viz. 4.1.3). Potřebná hodnotu získáme výpočtem ze vztahu:

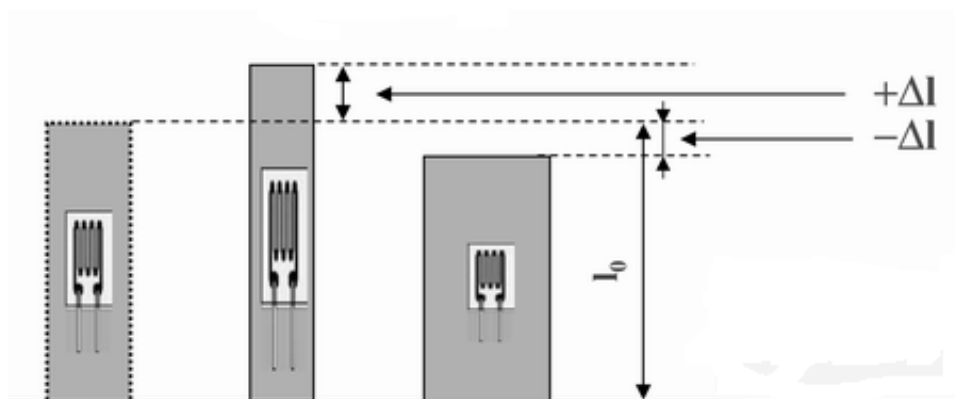
$$R = \frac{l \cdot \rho}{S} \quad (7.1)$$

kde:  $l$  – délka vodiče [m]  
 $S$  – průřez vodiče [mm<sup>2</sup>]  
 $P$  – měrný odpor [Ω.m]

Tenzometr upevněn (většinou přilepen) na povrch tělesa, které je deformováno, se prodlužuje, a tudíž mění i svůj odpor o hodnotu  $\Delta R$ , jehož velikost je přímo úměrná poměrnému prodloužení  $\varepsilon$ . Poměrné prodloužení je dáno vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7.2)$$

Protože je ve většině případů deformace tělesa malá, obvykle je v literatuře vyjadřována pomocí promile [‰]. Například:  $\varepsilon = 0,0004 [-] = 0,4 \text{ ‰}$ .



Obr. 25 - Základní princip tenzometrie [14]

Velikost změny odporu závisí na prodloužení délky vodiče  $l$  [m] o  $\Delta l$ , zmenšení průřezu vodiče  $S$  [mm<sup>2</sup>] příčnou kontrakcí o  $\Delta S$  a změně měrného odporu  $\rho$  [Ω.m<sup>2</sup>.m<sup>2</sup>]. Hodnoty těchto parametrů přesně vyjádřit je obtížné (obzvláště změnu měrného odporu), a tak je poměr mezi poměrnou změnou elektrického odporu a poměrným prodloužením dán vztahem:

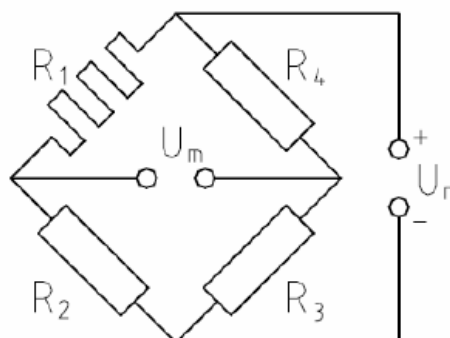
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (7.3)$$

kde:  $k$  – konstanta tenzometru → tu udává výrobce na obalu ( $\pm 2$ )

[11]

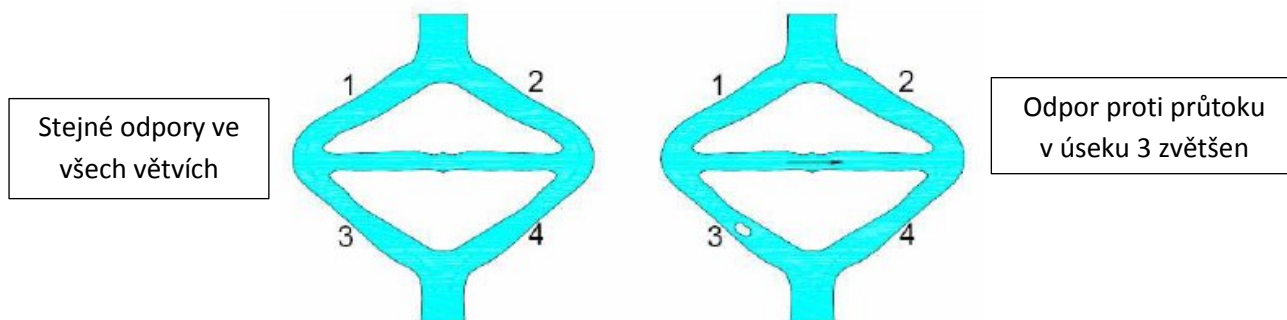
### 6.1.2 Zapojení do Wheatstonova můstku

Princip spočívá v zapojení čtyř odporů do můstku podle obr. 26. V tomto schématu je měřený tenzometr zapojen na místo jednoho z odporů, popřípadě místo dvou odporů či čtyř.



Obr. 26 - Wheatstonův můstek [11]

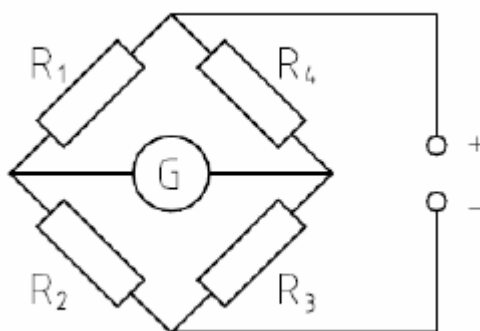
Pro další úvahy předpokládejme, že všechny čtyři odpory jsou stejné. Princip můstku lze pochopit z obr. 35. Ten znázorňuje potůček, který je pomocí dvou ostrůvků rozdělen na dvě ramena 1, 3 a 2, 4. Mezi ostrůvky jsou jednotlivá ramena propojena. [11], [13]



Obr. 27 - „Vodní / potůčkový“ model Wheatstonova můstku [13]

V případě, že odpory proti průtoku vody v jednotlivých ramenech 1, 2, 3 a 4 jsou stejné (viz obr. 27 vlevo), neproudí propojkou mezi ostrůvky žádná voda. V případě, že například do úseku 3 vložíme kámen, zvětšíme odpor proti průtoku v tomto úseku a část vody začne proudit přes propojku z úseku 1 do úseku 4. [11, 13]

Na stejném principu pracuje i elektrický Wheatstonův můstek. Proto v případě, že všechny čtyři odpory  $R_1$  až  $R_4$  jsou shodné (viz obr. 27 vpravo), neproudí přes uhlopříčku  $U_m$  žádný proud a v případě umístění galvanometru (citlivý miliampérmetr) do této uhlopříčky nenastane výchylka. [11]

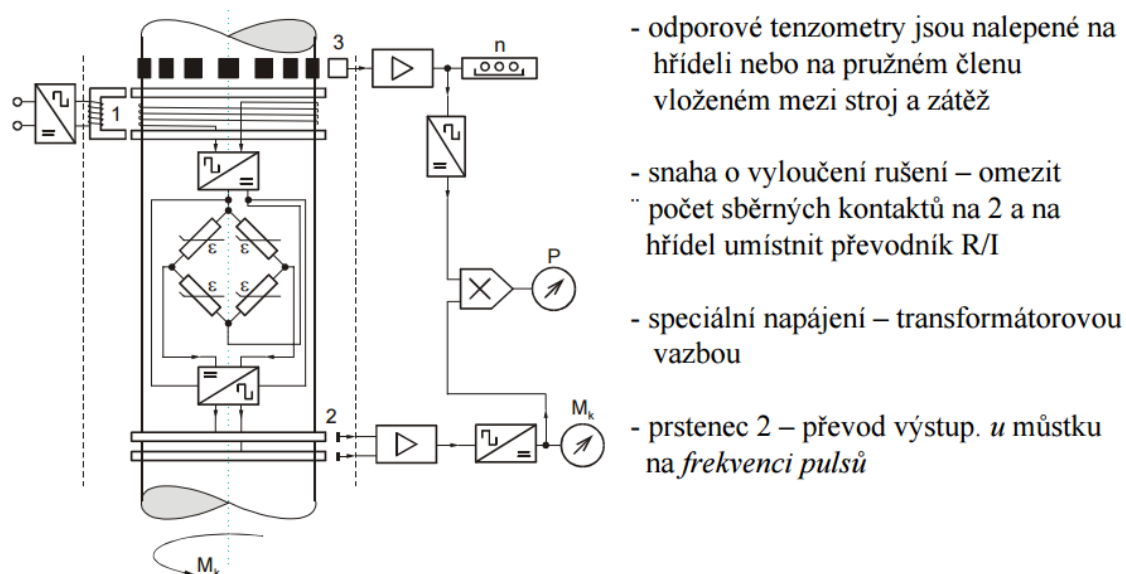


Obr. 28 - Zapojení do Wheatstonova můstku s galvanometrem [11]

Ve skutečnosti není nutné, aby všechny čtyři zapojené odpory byly shodné (obr. 28). Třeba pouze zamezit průchodu proudu galvanometrem, čehož dosáhneme vztahem:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (7.4)$$

Pokud se zapojení nachází v tomto stavu, označujeme ho jako vyvážený můstek. [12]



Obr. 29 - Přenos měronosného signálu z rotující části [2]

### 6.1.3 Kovové lepené tenzometry

Jedná se odporový článek přilepený na podložce, která se pak celá přilepí na měřenou část. Vlastní odporový drát má tvar mřížky. Ta je vytvářena tak, že příčné drátky mají větší průřez. Pro výrobu se nejčastěji používá konstantan ( $k \pm 2$ ). Celková hodnota odporu se pohybuje od 50 do 2500Ω (nejčastěji 120, 300, 600 Ω). Délka tenzometru bývá v rozsahu 3 až 35 mm, šířka 0,8 až 12 mm, tloušťka 0,05 až 0,1 mm a hmotnost cca 100 mg. V případech, kdy je třeba měřit poměrné prodloužení, se používá sdružených tenzometrů.

Z hlediska parametrů i technického využití jsou nejzajímavější obdélníkové odporové články (fólie). Na obr. jsou naznačeny základní konstrukce. Jsou zhotoveny z fólie tloušťky 1 až 10 μm, přilepené na podložce. Toto uspořádání umožňuje vyrábět snímače různých tvarů, uzpůsobené druhu namáhání, jakož i tvaru měřeného místa. Pro měření deformací membrán jsou vyráběny tenzometry tvaru bifilární spirály a podobných tvarů. Hlavní výhodou fóliových tenzometrů je možnost zvětšení zatížení elektrickým proudem až na hodnotu 0,5 A.

Toho se dosahuje větším poměrem obvodu průřezu vodiče k jeho ploše, a tím větším obvodem tepla, než je tomu u drátu kruhového průřezu. Výhodou je jednoduché pájení vývodů. Dají se tedy realizovat konstrukce, které jinou technikou nelze.

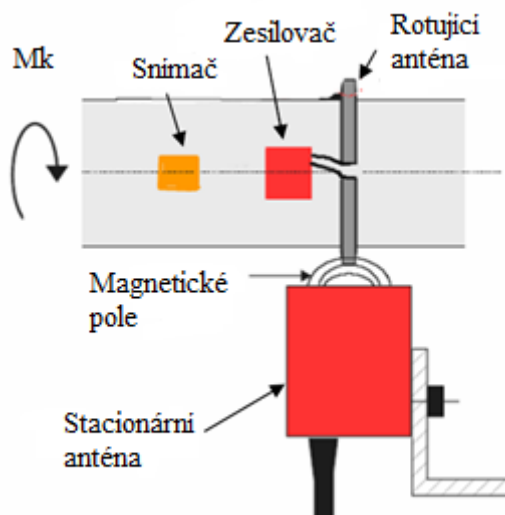
Jako nosná podložka se používá papír, umělé hmoty, tkaniny, azbest. Používá se speciální papír rýžový s velkým modulem pružnosti ve smyku.

Pro lepení je dnes nejvíce využíváno lepidel na bázi termoplastů. Vrstva lepidla musí být co nejmenší. Bezpodmínečně je třeba dodržet předepsaný postup lepení a používat lepidla, která doporučuje výrobce. [1]

#### 6.1.4 Snímání z rotujících částí

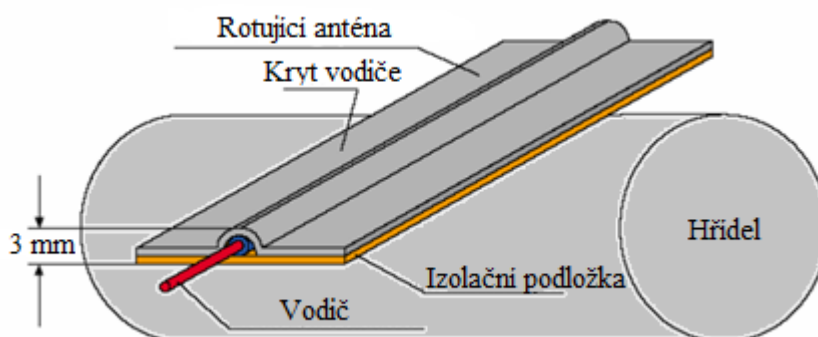
Na obr. 30 je možno vidět, jak jsou na povrchu poloosy nalepeny tenzometrické snímače, které jsou propojeny vodiči s rotující anténou. Mezi nimi je ještě umístěn zesilovač signálu. Z vnější strany rotující poloosy je nainstalována stacionární anténa, která pomocí vysokofrekvenčního magnetického pole přijímá signál z tenzometrů a také napájí, jak rotující anténu, tak zesilovač.

Omezujícím činitelem správné funkce tohoto snímače je vzdálenost stacionární a rotující antény, u které dochází k nerizikovému přenosu dat. [12], [15]

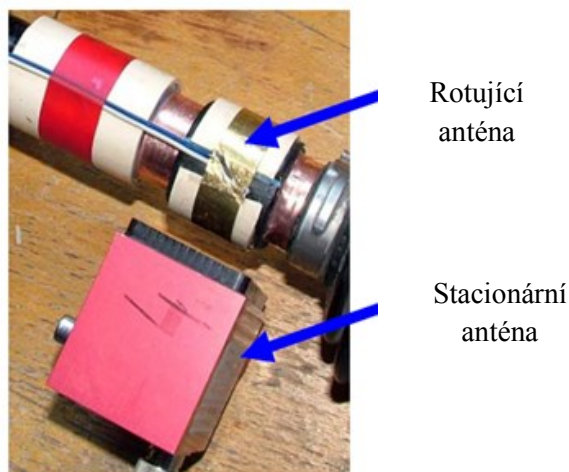


Obr. 30 - Bezkontaktní metoda měření na rotující poloose [12]

Konstrukčně může být rotující anténa zhotovena mnoha metodami. Může být tvořena vodičem kruhového průřezu uloženým v izolační vrstvě nalepené na povrchu hřídele (obr. 31) nebo je vodič tvořen měděnou fólií nalepenou přes izolační podklad (obr. 32). Protože je tento způsob přenosu signálu velmi závislý na místě zabudování a množství a druhu okolního materiálu (např. velké množství kovových částí v bezprostřední blízkosti antén výrazně snižuje dosah signálu), je nutné experimentálně ověřit funkčnost konkrétního provedení rotující antény na místě měření. Maximální vzdálenost antén pro přenos signálu deklarovaná výrobcem použité aparatury je až 40 mm. Pokud by se podařilo docílit přenosu signálu na tuto vzdálenost, neměl by nastat problém snímat točivý moment z poloos i v místě u kol, kde dochází k maximálnímu vertikálnímu posunu poloos v důsledku přejezdu nesrovnalosti. [12]



Obr. 31 - Způsob provedení rotující antény kruhovým vodičem [12]



Obr. 32 - Rotující anténa tvořena měděnou fólií [12]

Další možností může být využití digitálního rádiového telemetrického systému s aplikací tenzometru na rotujících hřídelích - automatické nastavení nuly přímo z přijímače. Tento telemetrický systém nazývaný MT1-PCM od firmy KMT nabízí nejjednodušší

manipulaci pro bezdrátový rádiový přenos tenzometrického signálů z rotujících hřídelí. Rozměry čidla a vysílače jsou 62 x 27 x 11 mm (každý bez konektorů). Každý modul má hmotnost asi 30g. Části čidla / vysílače jsou jednoduše namontovány na otočném hřídeli a přichyceny výztužnými pásky s pevnou ocelovou sponou. Napájení vysílací části je pomocí baterií (6-9V), příkon je 90 mA. Digitální přenos dat mezi vysílačem a přijímačem využívá kmitočtových pásem s 433MHz nebo s 868MHz, vysílací výkon je 10 mW. [17]



Obr. 33 - Telemetrický systém MT1 – PCM [17]

### 6.1.5 Místo pro umístění tenzometru

Pro správné umístění tenzometru je nejprve nutné si určit, kde chceme krouticí moment měřit, popřípadě určit místo, kde bude možno moment změřit co nejefektivněji. Tato volba závisí hlavně na typu vozidla a jeho konstrukčním řešení. Tudiž můžeme krouticí moment měřit na přední, zadní nápravě nebo na obou (klasický automobil), případně na levé či pravé poloose (obr. 35). Je možné také měření krouticího momentu na méně složitých strojích, kde stačí instalovat snímače pouze do středu jedné z náprav, případně poloos (např. motokára – viz obr. 34) apod. [12], [13]

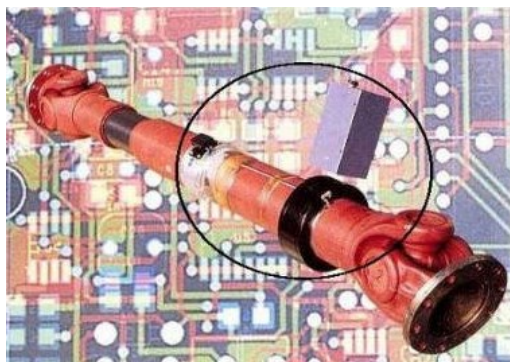


Obr. 34 - Poloha tenzometru u motokáry [13]





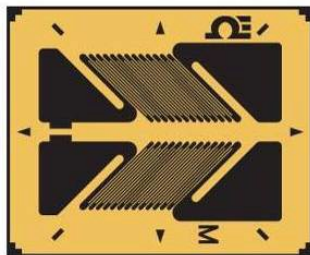
Obr. 35 - Poloha stacionární antény na pravé poloose [12]



Obr. 36 - Snímač krouticího momentu SX7 s bezdotykovým přenosem měřicího signálu a s bezdotykovým napájením na poloose nákladního automobilu [9]

### 6.1.6 Instalace tenzometru a úprava poloos

U klasického automobilu je ve většině případů nutné odmontování poloosy či poloos pro vhodnou instalaci tenzometrů. Ve specifických případech (viz motokára) se nemusí provádět demontáž poloos. Z teoretického hlediska si zvolme křížové tenzometry krouticího momentu od firmy Hottiner GmBH (obr. 37) s konstantou tenzometru  $k = 2,04$ , které se umístí vždy do středu každé poloosy. [12]



Obr. 37 - Tenzometr firmy Hottinger GmBH [12]



Před samotným lepením tenzometrů, je třeba z povrchu poloosy důkladně odstranit všechny nečistoty. Nejprve se musí zbavit koroze a nátěru, kvůli přesnosti měření, čehož docílíme zbrúšením (např. smirkovým papírem). Po zbrúšení je nezbytné poloosu očistit a odmastit. Čištění se provádí mnoha způsoby. Používá se lázeň nebo různé odmašťovací prostředky (aceton, technický benzín apod.). Pro co nejpresnější měření by se mělo důkladně očistit celé měřené vozidlo, ale z hlediska funkčnosti, bude fungovat i vyčištěná oblast cca 150 mm až 200 mm na všechny strany od lepeného místa.

Aby nedošlo během měření k jakémukoliv problému, používají se pro lepení následující lepidla – epoxidová, kaynokrylátová nebo polymetyl metakrylová. Co se týče vlastností, tak poslední dvě jsou naprosto jiné. Kaynokrylátová lepidla jsou rychleschnoucí (sekundová) a jsou vyráběna jako jednosložková. Kdežto epoxidová se vyrábějí jako dvousložková, což znamená, že vytvrzování probíhá chemickou reakcí obou složek. Nicméně nevýhodou je delší doba tvrdnutí. Nejideálnější volbou by byla lepidla polymetyl metakrylová, která tvrdnou poměrně rychle (okolo 2 min) a jejich největší výhodou je možnost aplikace na pórovitých površích. [13]

Po dovršení všech předchozích kroků můžeme přejít k lepení. Po nanesení lepidla na danou plochu je nutné vyčkat pro důkladné přilnutí – doba závisí tedy na druhu lepidla a manuálu výrobce. Poté mezi lepený tenzometr a přitlačnou podložku vložíme fólii (např. teflonovou), která je odolná vůči přilnutí. Následně vše dostatečně stáhneme pomocí různých pásek či bužírek přes gumovou zábranu, aby byl vytvořen stálý přitlačný tlak. Aby nedošlo k mechanickému poškození nebo zvlhnutí, mohou být tenzometry dodatečně pokryty lepidlem.

Když je lepení tenzometrů hotové, je ještě zapotřebí upevnění zesilovače signálu a jeho napojení na výstup z tenzometrů (obr. 38, 39). Potom se nainstaluje stacionární anténa a propojí se zesilovačem. [12], [13]



Obr. 38 - Levá poloosa po instalaci tenzometrů, zesilovače signálu a rotační antény [12]



**Obr. 39 - Pravá poloosa po instalaci tenzometrů, zesilovače signálu a rotační antény [12]**

Po kompletní instalaci obou poloos se vyzkouší v laboratorních podmínkách funkčnost signálu z rotačních na stacionární antény (viz obr. 40). Funkční rozsah vzdálenosti obou antén by se měl podle výrobce telemetrie pohybovat do 40 mm. [12]



**Obr. 40 - Ověření funkce snímačů po kompletní přípravě [12]**

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro měření jsem využil laboratoř katedry KMTA, kde mi bylo umožněno experimentálně změřit krouticí moment poloosy prototypového elektromobilu SCX2. Cílem tedy bylo změřit krouticí moment elektromobilu na zadní pravé nápravě a ověřit či upřesnit hodnoty krouticího momentu vůči vypočítaným hodnotám z frekvenčního měniče, které nemusely být přesné. Použil jsem sadu tenzometrů Starter Set DAK 1 od firmy HBM (obr. 41, 42).



Obr. 41 - Sada tenzometrů Starter Set DAK 1



Obr. 42 - Sada tenzometrů Starter Set DAK 1

Nejdříve jsem musel sundat pravé zadní kolo a poloosu pečlivě zbavit všech nečistot. Pomalu jsem začal brousit místo, kde jsem potřeboval lepit tenzometry. Poloosy zůstaly namontovány na nápravě, protože funkčnost měření bylo dostačující.



Obr. 43 - Poloosa bez jakéhokoliv opracování

Po vybroušení veškeré barvy jsem se dostal až na kov, což garantovalo přesnost měření (obr. 45). Poté jsem pomocí profesionálního prostředku RMS 1 (obr. 44) odmastil dané místo. Na papírový ubrousek jsem nanесl pár kapek odmašťovadla a pomalu, rovnoměrnými krouživými pohyby jsem zbavil poloosu všech nežádoucích látek.





**Obr. 44 - Odmašťovadlo RMS 1  
Reinigungsmittel**



**Obr. 45 - Vybroušené a odmaštěné místo pro lepení**

Následně jsem si určil místa, kam dané tenzometry nalepit a pomocí speciálního kaynokrylátového lepidla Z 70 (obr. 47) nanasl vrstvu.



**Obr. 46 - Poloosa s nalepenými tenzometry**

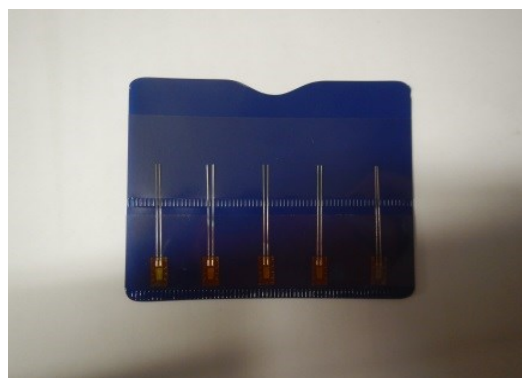


**Obr. 47 - Lepidlo Z 70  
Schnellklebstoff**

Na ni jsem opatrně položil tenzometry (obr. 46), na které jsem začal tlačit teflonovou fólií (obr. 48), abych vytvořil co nejlepší podmínky pro přilnutí.

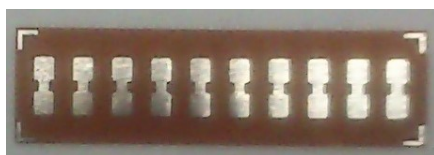


**Obr. 48 - Teflonová fólie**



**Obr. 49 - Sada použitých tenzometrů**

Poté jsem nechal asi 24 hodin vše ustát kvůli dosažení největší pevnosti lepení. Byly použity tenzometry (obr. 49), které měly k-faktor 1,98 a byly s vývody, takže byly potřeba ještě pájecí svorky (obr. 50), které zabrání teplotní dilataci vývodových drátků. Mezi svorkami a tenzometry byly nechány cca milimetrové mezery kvůli tzv. „omegám,“ které zamezují teplotní dilataci. [14]



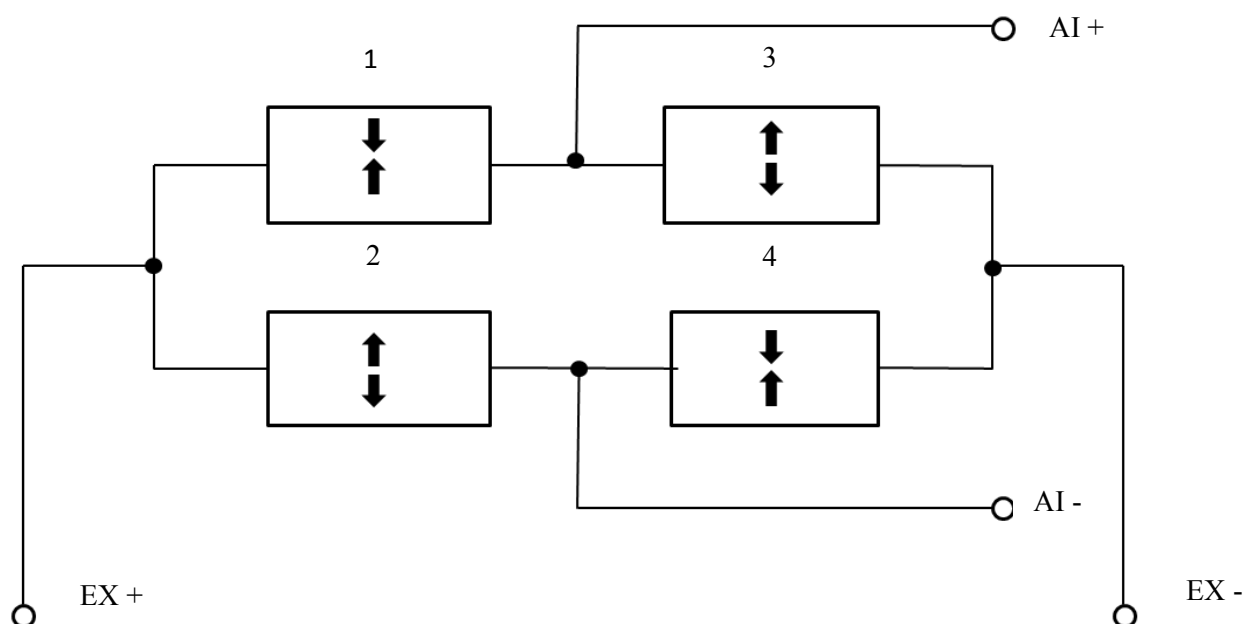
**Obr. 50 - Pájecí svorky**

Všechny nalepené svorky a tenzometry jsem nechal cca 24 hodin pořádně zaschnout pod neustálým přitlačným tlakem, kterého jsem dosáhl aplikací stahovacích pásků. Poté jsem zapájel první polovinu svorek s každým vývodem každého tenzometru a druhou polovinu s drátky, které vedli do dalších svorek. Ty spojovali tenzometry napájením a plnily funkci odporu. Drátky jsem přichytil k poloose izolační páskou kvůli lepší manipulaci s pájkou (obr. 51).



**Obr. 51 - Tenzometry spojené s drátky napájením na svorkách**

Po napájení všech tenzometrů se svorkami jsem udělal kontrolu funkčnosti, jelikož vzhled některých pájených spojů nebyl ideální, a to tak, že jsem změřil odpory na všech čtyřech tenzometrech pomocí multimetru - odpor nesměl přesahovat hodnotu  $120\ \Omega$ , což se také nestalo (odpory se pohybovali většinou od  $119,6$ - $119,8\ \Omega$ ). Tenzometry byly zapojeny do můstku tak, aby byla jedna dvojice namáhána na tah a druhá na tlak (obr. 52).

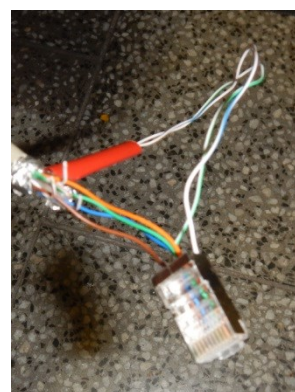


Obr. 52 - Zapojení do můstku

Dále jsem musel propojit tenzometrický můstek s napájením. Použil jsem 8 - žilový, stíněný, komunikační kabel složený z několika částí. Vnější část je tvořena PVC obalem, pod ním je mylarová fólie, vnitřní krytí, bavlněný provázek, lanko a kříž, ve kterém jsou zavedeny dráty. Krom hliníkové fólie, která se použila jako stínění (aby nedošlo k rušení), byly všechny tyto části odstraněny. V kabelu je tedy osm měděných drátů pokrytých PE izolací. Na koncích byly napájeny na hliníkovou fólii další dva měděné drátky, které se nasunuly do prvního a posledního otvoru v konektoru RJ-50 (obr. 54) kvůli stínění. Protože obvod byl zapojen do můstku, nebylo třeba využít všech osmi drátků, nýbrž pouze čtyř. Ty byly vloženy do příslušných otvorů konektoru. Následně jsem konektor s drátky sešil pomocí krimpovacích kleští. Poté jsem druhou stranu kabelu spájel s odpovídajícími výstupy tenzometrů. Konektor byl následně vložen do modulu NI 9237 (obr. 53), jež slouží k napájení a měření odporů tenzometrů.



Obr. 53 - Modul NI 9237



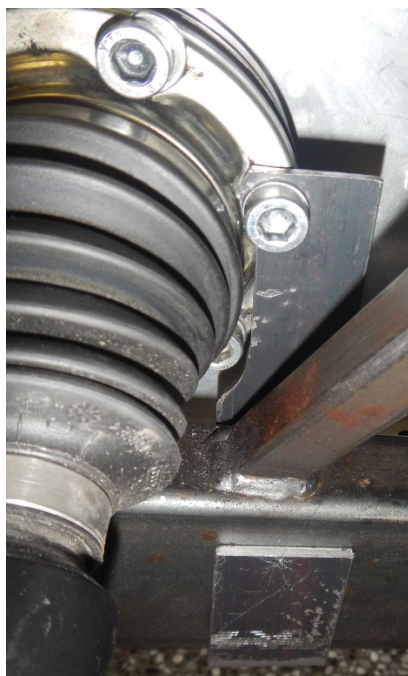
Obr. 54 - Konektor RJ-50

Následně jsem vytvořil páku k poloose kvůli kalibraci a stanovení měřítka. Postupoval jsem tak, že jsem si uřezal 60 cm železný profil a uchytil jej šrouby na náboj kola kolmo na poloosu (obr. 55).



Obr. 55 - Profil sloužící jako páka se zakreslenou vzdáleností ramena a působením síly

Dále jsem si vytvořil ukotvující prvky pro zablokování otáčení poloosy. Použil jsem pásovinu šířky 5 mm, kterou jsem nejprve natvaroval do použitelného tvaru a poté našrouboval na druhou část poloosy (obr. 56).



Obr. 56 - Ukotvující prvek

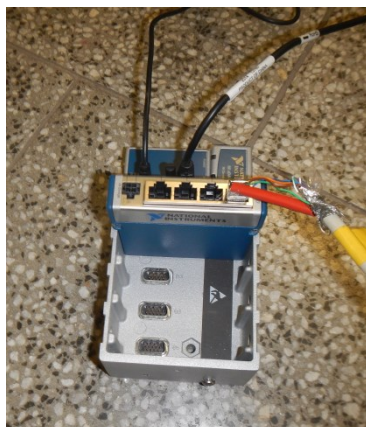


Po všech přípravných pracích jsem mohl začít měřit. Krouticí moment jsem měřil lineárně. Nejprve jsem si na páce zakreslil místo vzdálené 0,5 m od středu poloosy a následně začal postupně zavěšovat závaží o hmotnosti 1,54 kg, 3,08 kg, 22,9 kg, 32 kg a 45,8 kg. Tím jsem dostal požadovanou výchylku (obr. 57).



**Obr. 57 - Zavěšená závaží o hmotnosti 3,08 kg**

Výstupní signál byl napojen přes modul NI cDAQ-9174 (obr. 58), který slouží pro jednoduché propojení snímače s počítačem přes USB, na software LabView, který vyhodnocoval dané měření. Výstupní hodnoty byly v  $\mu\text{Strainech}$ .



**Obr. 58 - Modul NI cDAQ – 9174**

Poté jsem si spočetl výsledné momenty dle vztahu 3.3, které by měly být přímo úměrné výstupním hodnotám v  $\mu\text{Strainech}$ . Sílu jsem vypočítal dle vztahu

$$F = m \cdot g, \quad (7.1)$$

kde  $m$  je hmotnost závaží a  $g$  tíhové zrychlení rovné  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

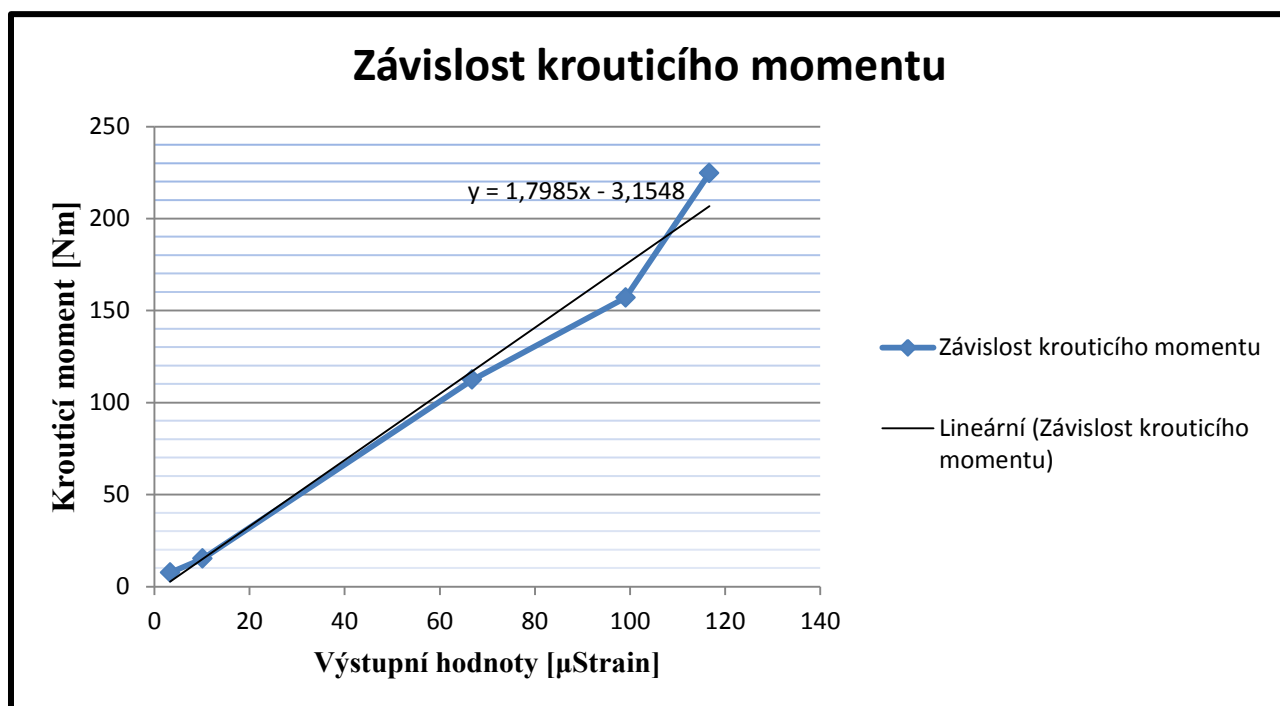


Příklad výpočtu:

$$F = m \cdot g = 1,54 \cdot 9,81 = 15,1074 \text{ N} \rightarrow M_k = F \cdot r = 15,1074 \cdot 0,5 = 7,5537 \text{ Nm}$$

Měření číslo	Délka ramene [m]	Hmotnost závaží [kg]	Síla [N]	Krouticí moment [Nm]	Výstupní hodnoty [μStrain]
1.	0,5	1,54	15,1074	7,5537	3,3
2.	0,5	3,08	30,2148	15,1074	10,1
3.	0,5	22,9	224,649	112,3245	66,8
4.	0,5	32	313,92	156,96	99,1
5.	0,5	45,8	449,298	224,649	116,7

Obr. 59 - Tabulka vypočítaných a naměřených hodnot



Obr. 60 - Graf závislosti krouticího momentu

## 8 ZÁVĚR

Dle mého názoru je jasné, že měření krouticího momentu nekonvenčními metodami má velký potenciál. Nejen z hlediska ověření, ale také upřesnění. Je to problematika, která se bude neustále dále rozvíjet a přinášet nové řešení a aplikace. Samozřejmě zde také patří měření na poloose.

Pro využití v praxi bude zcela jistě nejpříjemnější se zabývat měřením pomocí rotačních snímačů krouticího momentu, nejlépe odporovými tenzometrického typu například od firmy ESA. Ty pracují na principu snímání smykového napětí, jako deformačního prvku využívají rotující hřídele a mají poměrně dobré dynamické vlastnosti. Určují přímo deformaci hřídele mezi motorem a zátěží. Také se jedná o snímače s celkem jednoduchou montážní aplikací a odolností vůči parazitním vlivům. Pro přenos dat bych doporučil použití bezkontaktní metody, tedy přijímání signálu telemetrickým systémem z rotující části bezdrátovým digitálním rádiovým přenosem na frekvencích od 433 do 868 MHz například od firmy KMT. Tento systém má poměrně malé rozměry i hmotnost, což by umožňovalo aplikaci na poloosu automobilu. Zdroj je vyřešen formou 6 až 9 V baterií. Tato metoda umožňuje vynikající výsledky měření, manipulaci a zamezuje chybám a nepřesnostem.

Tento problém se vyskytl i v mém experimentálním měření. V ideálním stavu by výstupní křivka grafu měla být lineární. Z grafu je patrné, že nelinearita křivky byla způsobena nepřesností měření, která byla pravděpodobně zapříčiněná nezajištěnou manipulací při zavěšování závaží s větší hmotností a nižším počtem měření z důvodu nedostatku zkalibrování závaží s větší hmotností. Nicméně dané řešení bylo naprosto funkční, což dokazují minimální výchylky mezi naměřenými hodnotami při měření se závažími s menší hmotností a teoretickými vypočítanými hodnotami na páce. Určitě bych doporučil použití tenzometrů pro další měření. Jsou velice odolné, dobře přilnavé, měří s vysokou citlivostí a přesností, jsou ideální i pro měření jiných veličin – hmotnosti, tlaku. Mezi nevýhody, které bych zmínil, patří tedy kontaktní metoda – po drátu, což tedy neumožňuje snímání při provozu a poměrně dlouhá a náročná manuální příprava, jelikož tenzometry, drátky, svorky jsou velice malé komponenty. Avšak veškeré experimenty proběhly v pořádku a bez komplikací a daný návrh a provedení řešení je připraveno k dalšímu měření.

## 9 ZDROJE

- [1] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2., upr. a dopl. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. [cit. 2016-04-20]
- [2] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01500-9. [cit. 2016-04-20]
- [3] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura,
- [4] Měřicí soustavy. [Http://www.smilekj.wz.cz](http://www.smilekj.wz.cz) [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.smilekj.wz.cz/skripta%20pdf/mereni%20%20merici%20soustavy%20skripta.pdf>
- [5] VÁVRA, Josef. *ZPŮSOBY MĚŘENÍ OTÁČEK A KROUTICÍHO MOMENTU V AUTOMATIZOVANÝCH SYSTÉMECH*. Brno, 2009. VUT. [cit. 2016-04-20]
- [6] Senzory síly a hmotnosti. [measure.fel.cvut.cz/](http://measure.fel.cvut.cz/) [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://measure.fel.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38ssd/05\\_sila\\_moment.pdf](http://measure.fel.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38ssd/05_sila_moment.pdf)
- [7] SÁSIK, Ján. *Viaczložkové snímače síl a momentov: meranie, testovanie a kalibrácia*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. ISBN 80-227-1438-0. [cit. 2016-04-20]
- [8] MĚŘENÍ MOMENTU SÍLY. *Virtuální laboratoř* [online]. Brno, 2003 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/KA04-09.htm>
- [9] SMUTNÝ, Pavel. *Základní typy měřičů síly*. [online] e-automatizace.cz [cit. 2016-04-20] Dostupné z: [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/moment/ramce\\_moment.htm](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/moment/ramce_moment.htm)
- [10] KŘEMEN, Jan. *BEZKONTAKTNÍ SNÍMAČ KROUTICÍHO MOMENTU*. Brno, 2012. VUT.
- [11] FOLTA, Zdeněk.; *Základní principy odporové tenzometrie. Odporová tenzometrie* [online]. 2009 [cit. 2016-04-20], s.10-14. Dostupný z www: <http://www.347.vsb.cz/staff/folta>
- [12] FOLTA, Zdeněk a Milena HRUDIČKOVÁ. *Zpracování zátěžných spekter převodovky osobního automobilu za různých jízdních podmínek*. ČVUT Praha [online]., Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10401077-Zpracovani-zateznych-spekter-prevodovky-osobniho-automobilu-za-ruznych-jizdnich-podminek.html>
- [13] ŠATNÝ, Jan. *Návrh a konstrukce pohonu motokáry*. Ostrava, 2009. VŠB – TU Ostrava.

- [14] HOFFMAN, Karl. *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik, 1989
- [15] A Guide for Installing a Torque Sensor HBM. *AZO Sensors* [online]. United States, Marlborough, 2015 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.azosensors.com/Article.aspx?ArticleID=604>
- [16] PAVČO, Martin. *Měření mechanického napětí tenzometry na rámu lehkého vozidla*. Ostrava, 2015. VŠB – TU Ostrava.
- [17] MT1 - PCM. *KMT Telemetry* [online]. Gewerbering, 2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.kmt-telemetry.com/telemetry/1-channel-telemetry/mt1-pcm/>